

ANALISIS PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI PAKSA NANOFLUIDA AIR- Al_2O_3 DALAM SUB-BULUH VERTIKAL SEGIENAM

FORCED CONVECTION HEAT TRANSFER ANALYSIS OF WATER- Al_2O_3 NANOFLUIDS IN VERTICAL HEXAGONAL SUB-CHANNEL

Asiah Hasanah¹, Dr. Abrar Ismardi, M.Sc², Drs. K. Kamajaya MT.³

¹Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

²Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

³BATAN, Bandung

¹ asiahasanah26@gmail.com, ² abrarselah@gmail.com, ³ kamajaya@batan.go.id

Abstrak

Penerapan nanofluida sebagai fluida pendingin reaktor nuklir memiliki banyak aspek yang harus diperhitungkan seperti dimensi, ukuran, jenis aliran, jenis nanofluida dan konsentrasi nanopartikel di dalam fluida akan mempengaruhi koefisien perpindahan panas yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan nanofluida air- Al_2O_3 sebagai fluida pendingin yang diaplikasikan dalam sub-buluh vertikal segienam dan menggunakan aliran konveksi paksa. Perangkat uji beserta susunan pipa pemanas telah dirancang sedemikian rupa menyerupai susunan bahan bakar dan bentuk teras reaktor pada reaktor TRIGA BATAN Bandung.

Persamaan korelasi perpindahan panas konveksi paksa menggunakan nanofluida air- Al_2O_3 yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

Laju aliran 6 liter/menit	: $\text{Nu} = 6,321 \text{ Gz}^{0,446}; 159,012 \leq \text{Gz} \leq 556,542$
Laju aliran 10 liter/menit	: $\text{Nu} = 0,864 \text{ Gz}^{0,761}; 265,020 \leq \text{Gz} \leq 927,570$
Laju aliran 12 liter/menit	: $\text{Nu} = 1,727 \text{ Gz}^{0,707}; 318,024 \leq \text{Gz} \leq 1113,084$

Hasil penelitian menunjukkan nilai koefisien perpindahan panas nanofluida air Al_2O_3 lebih tinggi sekitar 90%-100% dari koefisien perpindahan panas air. Hal tersebut telah dibuktikan baik dari persamaan korelasi yang dihasilkan maupun data eksperimen.

Kata kunci: nanofluida, sub-buluh, segienam, Al_2O_3 , konveksi paksa

Abstract

Application of nanofluids as a nuclear reactor coolant has many aspects to be reckoned such as the dimension, size, types of fluid flow, types of nanofluids and concentration of nanoparticles in base fluid would affect the value of heat transfer coefficient. This research used water- Al_2O_3 nanofluids as a cooling fluid that was applied in a vertical hexagonal sub-channel and using forced convection flow. The research equipment and the arrangement of heating pipes have been designed to resemble the structure of nuclear reactor core and terrace of reactor TRIGA BATAN Bandung.

The heat transfer empirical correlation in forced convection flow using water- Al_2O_3 nanofluids as a cooling fluids from this research could be written in equations below.

Flow rate of 6 liters/minute	: $\text{Nu} = 6,321 \text{ Gz}^{0,446}; 159,012 \leq \text{Gz} \leq 556,542$
Flow rate of 10 liters/minute	: $\text{Nu} = 0,864 \text{ Gz}^{0,761}; 265,020 \leq \text{Gz} \leq 927,570$
Flow rate 12 liters/minute	: $\text{Nu} = 1,727 \text{ Gz}^{0,707}; 318,024 \leq \text{Gz} \leq 1113,084$

The result showed that heat transfer coefficient of water- Al_2O_3 nanofluids is higher about 40%-50% than heat transfer coefficient of water. It has been proven by both of empirical correlation and experimental data.

Keywords: nanofluids, sub-channel, hexagon, Al_2O_3 , forced convection

1. Pendahuluan

Reaktor nuklir membutuhkan suatu sistem pendingin yang sangat penting dalam aspek keselamatan pada saat pengoperasian reaktor. Pada umumnya suatu reaktor menggunakan air (H_2O) sebagai fluida pendingin. Namun, belakangan ini nanofluida menjadi populer karena banyak peneliti yang ingin memanfaatkan keunggulan dari nanofluida dalam berbagai sistem pendingin terutama sebagai sistem pendingin reaktor nuklir [1].

Nanofluida merupakan fluida yang mengandung nanopartikel di dalamnya. Dalam berbagai aplikasi yang menyangkut transfer panas, nanofluida memiliki kemampuan perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan air biasa. Hal ini tentu sangat menguntungkan apabila nanofluida diaplikasikan sebagai pendingin reaktor karena dapat menyerap dan memindahkan kalor lebih baik.

Manca et al. melakukan penelitian studi numerik investigasi karakteristik perpindahan panas secara konveksi menggunakan nanofluida air- Al_2O_3 di dalam tabung melingkar. Dalam penelitian tersebut, seksi uji yang digunakan berupa tabung melingkar yang dilengkapi dengan pemanas pada dinding tabung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas meningkat jika laju aliran nanofluida meningkat. Koefisien perpindahan panas juga meningkat pada saat menggunakan konsentrasi nanopartikel yang lebih tinggi [2].

Berdasarkan penelitian Jacopo Buongiorno dan Lin-wen Hu, salah satu syarat nanofluida yang dapat digunakan pada sistem pendingin reaktor nuklir yaitu memiliki kemampuan penyerapan neutron yang rendah dan waktu paruh yang pendek agar tidak mengganggu reaksi fisi yang terjadi pada reaktor [3]. Saat ini penelitian mengenai sistem pendingin reaktor nuklir hanya menggunakan nanofluida Al_2O_3 dan ZrO_2 karena kedua material tersebut diketahui memiliki kemampuan penyerapan neutron yang rendah dan waktu paruh yang pendek sehingga sesuai untuk diaplikasikan sebagai fluida pendingin reaktor.

Pemanfaatan nanofluida sebagai pendingin reaktor membutuhkan suatu pengkajian. Selain dari segi dimensi, ukuran dan jenis aliran yang akan digunakan juga akan berpengaruh dalam proses perpindahan panas. Oleh karena itu, analisis mengenai perpindahan panas pada sub-buluh vertikal menggunakan nanofluida perlu dilakukan sebelum diterapkan ke reaktor nuklir. Perhitungan laju aliran yang digunakan, pengukuran temperatur bahan bakar reaktor, dan konsentrasi nanopartikel yang diberikan dalam nanofluida akan menentukan nilai koefisien perpindahan panas yang dihasilkan [4]. Penelitian ini menggunakan nanofluida air- Al_2O_3 dengan konsentrasi 0,05% berat sebagai fluida pendingin menggunakan konveksi paksa dalam sub-buluh vertikal segienam. Pemilihan susunan sub-buluh segienam didasari atas susunan bahan bakar yang dibentuk segienam pada reaktor nuklir di BATAN Bandung. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan persamaan-persamaan korelasi empirik untuk memperoleh nilai koefisien perpindahan panas di sekitar sub-buluh dan mengetahui perbandingan koefisien perpindahan panas pada saat menggunakan fluida air dan air- Al_2O_3 .

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan model alat uji sub-buluh vertikal segienam yang telah dirancang dalam penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh M. Maktabifard dan N. P. Tandian yang berjudul *Theoretical Study of Forced Convective Heat Transfer in Hexagonal Configuration with 7 Rod Bundles Using Zirconia-water Nanofluid* [5]. Penelitian tersebut menggunakan simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics) FLUENT untuk mendesain alat uji sub-buluh segienam.

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tabung seksi uji, pompa, dua tangki penampung fluida, jalur pipa, heat exchanger, dan rotameter. Fluida kerja yang digunakan sebagai material uji adalah nanofluida air- Al_2O_3 .

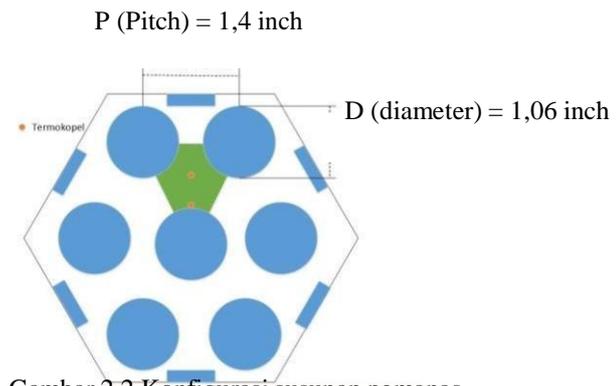
Metode yang digunakan dalam menyelesaikan persoalan mengenai perpindahan panas konveksi sub-buluh vertikal segienam menggunakan nanofluida air- Al_2O_3 adalah melalui pendekatan secara eksperimental.

Dalam pengujian ini, sistem pendingin primer menggunakan fluida kerja air- Al_2O_3 . Sistem pendingin sekunder menggunakan fluida kerja air. Debit aliran pendingin primer yang masuk pada seksi uji dengan laju alir konstan sebesar 6, 10, dan 12 liter/menit, sedangkan laju alir pendingin sekunder konstan 20 liter/menit. Kalor pada sistem pendingin primer ditransfer ke sistem pendingin sekunder melalui sebuah *heat exchanger* tipe plat. Kemudian terhadap susunan pemanas yang ditempatkan pada bagian seksi uji dilakukan perubahan daya pemanas dengan cara mengatur tegangan kerja pada pemanas. Daya pemanas mulai dari 200 W, 300 W, 400 W, 500 W, dan 600 W. Besar arus, tegangan, dan daya listrik yang dibutuhkan untuk setiap pengujian diukur secara langsung menggunakan clamp meter.

Gambar alat uji yang sudah terinstalasi jalur pipa beserta konfigurasi susunan pemanas diberikan pada Gambar 2.1 dan 2.2. Rangkaian alat uji beserta jalur aliran pendingin primer dan sekunder yang terdapat pada penjelasan sebelumnya ditunjukkan pada Gambar 2.3.



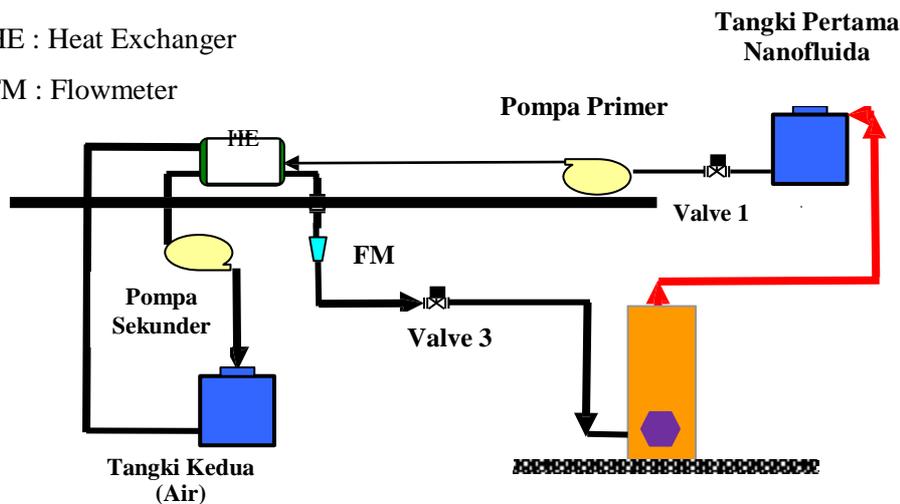
Gambar 2.1 Alat uji dan jalur aliran pipa



Gambar 2.2 Konfigurasi susunan pemanas

HE : Heat Exchanger

FM : Flowmeter



Gambar 2.3 Rangkaian alat uji

Untuk setiap pengujian dilakukan pencatatan temperatur fluida pendingin dan temperatur permukaan pemanas pada tujuh titik pengukuran dengan ketinggian yang berbeda. Perekapan data temperatur untuk setiap pengujian dilakukan setelah pemanas dijalankan selama kurang lebih satu jam untuk mendapatkan nilai temperatur fluida dan dinding pemanas dalam kondisi *steady* dilihat dari perubahan nilai data temperatur salah satu titik pengukuran pipa pemanas.

Setiap pemanas memiliki termokopel yang ada di dalam pipa pemanas yang berjumlah lima termokopel. Termokopel di dalam pipa pemanas berfungsi hanya sebagai indikator untuk menentukan komponen pemanas yang terdapat di bagian dalam pipa pemanas berfungsi dengan baik. Apabila salah satu komponen pemanas yang terdapat di dalam pipa pemanas mati, maka akan ada bagian dari dinding pemanas yang tidak mengalami pemanasan. Hal tersebut nantinya akan berpengaruh pada data pengukuran yang dihasilkan. Untuk memastikan setiap pemanas bekerja dengan baik, maka lima termokopel tersebut dihubungkan ke data akuisisi sehingga setiap perubahan temperatur dapat tercatat. Untuk pengambilan data temperatur fluida dan dinding pemanas sebagai input data temperatur yang akan dianalisis menggunakan termokopel yang dapat digerakkan. Termokopel tersebut memiliki ujung dengan dua cabang, dimana cabang pertama mengukur temperatur dinding pemanas dan cabang yang lainnya mengukur temperatur fluida.

3. Analisis

Nilai koefisien perpindahan panas (h) dari setiap variasi percobaan dapat dihitung menggunakan persamaan umum konveksi yang dituliskan pada Persamaan 1.

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Untuk membuat persamaan korelasi dari percobaan yang dilakukan, maka nilai dari beberapa parameter tak berdimensi untuk aliran konveksi harus diketahui. Pada dasarnya, percobaan ini menggunakan alat yang didesain untuk konveksi paksa. Namun setiap konveksi paksa pasti memiliki pengaruh konveksi alami juga, hanya saja dibutuhkan beberapa parameter khusus untuk menentukan apakah pengaruh konveksi alami tersebut besar atau tidak. Oleh karena itu, penentuan jenis konveksi diperlukan sebelum melakukan pembuatan korelasi agar parameter dalam pembuatan korelasi yang digunakan sesuai.

Penentuan jenis konveksi dilakukan dengan cara menganalisis bilangan tak berdimensi yaitu bilangan Richardson. Berikut pengelompokan jenis aliran konveksi berdasarkan bilangan Richardson (Gr/Re^2).

- $(Gr/Re^2) \ll 1$ merupakan konveksi paksa
- $(Gr/Re^2) \gg 1$ merupakan konveksi alami
- $(Gr/Re^2) \sim 1$ merupakan konveksi gabungan

Nilai Grashof dan Reynold suatu aliran dinyatakan pada Persamaan 2 dan 3.

$$Gr = \frac{g \rho \beta D_h^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (3)$$

Persamaan korelasi yang dihasilkan akan berbeda untuk jenis aliran konveksi yang berbeda. Jenis persamaan korelasi untuk konveksi alami, paksa, ataupun gabungan dikelompokkan sebagai berikut.

$$\text{Konveksi alami : } Nu = C (Gr^m Pr^n) \quad (4)$$

$$\text{Konveksi paksa : } Nu = C (Re^m Pr^n) \quad (5)$$

Kedua persamaan tersebut hanya dapat digunakan pada aliran yang telah berkembang penuh (*fully developed*). Untuk aliran yang masih berkembang (*developing*), parameter tak berdimensi lain dibutuhkan dalam pembentukan korelasi konveksi. Bilangan tak berdimensi lainnya yang dapat digunakan adalah bilangan Graetz. Dengan menggunakan bilangan Graetz, maka korelasi konveksi merupakan hubungan antara bilangan Nusselt dengan Graetz seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 6.

$$Nu = C (Gz^m) \quad (6)$$

Bilangan Graetz dapat dituliskan dalam bentuk seperti berikut.

$$Gz = Re Pr D_h/x \quad (7)$$

Adapun x merepresentasikan jarak ataupun ketinggian posisi pengukuran yang diukur dari ujung bawah pemanas. Dengan menggunakan parameter D_h/x , maka nilai Nusselt yang dihasilkan pada setiap percobaan dapat dikelompokkan berdasarkan ketinggian posisi pengukuran.

Nilai Prandtl dari fluida kerja dan Diameter hidrolis (D_h) segienam dinyatakan pada persamaan berikut.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (8)$$

$$Gz = D_h \left[2 \left(\frac{D_h}{x} \right)^2 - 1 \right] \quad (9)$$

4. Hasil dan Pembahasan

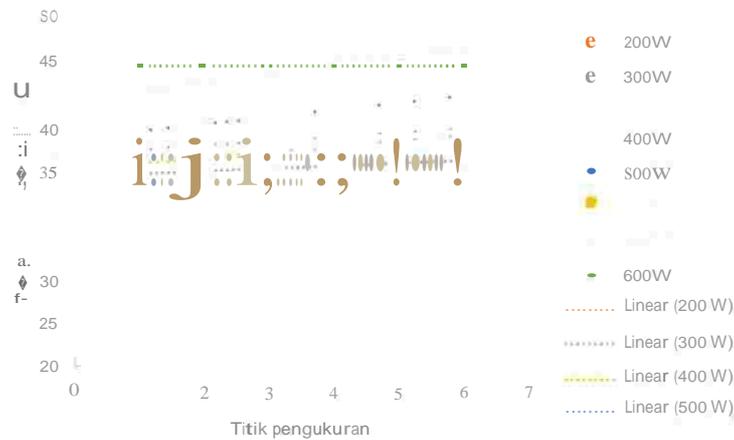
Percobaan perpindahan panas pada penelitian ini hanya menggunakan nanofluida air- Al_2O_3 dengan konsentrasi 0,05% berat sebagai fluida pendingin. Untuk mendapatkan data fluida air sebagai pembanding, penelitian ini menggunakan data air yang telah diperoleh dari disertasi yang dilakukan oleh Diah Hidayanti Sukarno yang berjudul Studi Konduktivitas Termal dan Perpindahan Panas Konveksi Fluida Nano ZrO_2 -Air [6].

Data temperatur fluida dan temperatur dinding pemanas diambil pada tujuh titik pengukuran pemanas yang berbeda. Data temperatur yang terukur pada titik terbawah pemanas tidak digunakan karena memiliki efek yang signifikan bagi pembacaan termokopel. Aliran fluida yang deras dari pompa yang mengalir melalui sub buluh dari titik pengukuran terbawah mengganggu proses pembacaan termokopel pada saat mengukur temperatur dinding pemanas dan temperatur fluida pada titik pengukuran pertama. Oleh karena itu data temperatur yang diolah hanya dari enam titik pengukuran. Adapun jarak titik pengukuran pemanas yang terukur dari ujung bawah pemanas ditampilkan pada tabel berikut.

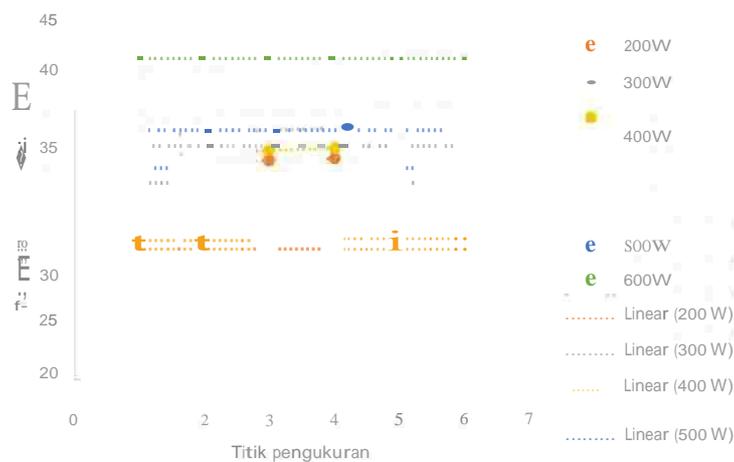
Tabel 4.1 Jarak titik pengukuran pemanas yang terukur dari ujung pemanas

Titik pengukuran	Jarak dari ujung pemanas (m)
1	0,1
2	0,15
3	0,2
4	0,25
5	0,3
6	0,35

Hasil pengukuran menunjukkan temperatur dinding cenderung meningkat dengan adanya kenaikan titik pengukuran pemanas, begitu juga dengan temperatur nanofluida. Hal ini disebabkan oleh nanofluida yang dialirkan ke sub-buluh mendapatkan pemanasan secara kontinyu dari ujung pemanas bawah hingga ke ujung pemanas atas yang mengakibatkan temperatur nanofluida semakin besar per titik pengukuran. Temperatur nanofluida yang semakin besar mengakibatkan kemampuan penyerapan kalor yang dihasilkan oleh pemanas semakin berkurang, sehingga temperatur pemanas juga cenderung meningkat seiring dengan kenaikan posisi titik pengukuran pemanas. Hal tersebut ditunjukkan pada gambar grafik berikut.



Gambar 4.1 Grafik temperatur dinding pemanas terhadap titik pengukuran dengan variasi daya pada aliran 12 liter/menit



Gambar 4.2 Grafik temperatur nanofluida air- Al_2O_3 terhadap titik pengukuran dengan variasi daya pada aliran 12 liter/menit

Selain posisi titik pengukuran, input daya yang diberikan juga mempengaruhi temperatur yang dihasilkan. Semakin besar daya yang diberikan, maka temperatur yang dihasilkan juga akan semakin tinggi.

Dari seluruh variasi percobaan yang dilakukan, nilai koefisien perpindahan panas maksimum yang dihitung menggunakan persamaan 1 untuk daya 200 W hingga 600 W adalah $8060,114 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $10351,683 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $10955,265 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $10131,178 \text{ W/m}^2\text{°C}$, dan $12023,398 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Seluruh nilai koefisien perpindahan maksimum tersebut dihasilkan dari percobaan yang menggunakan aliran 12 liter/menit. Sehingga dapat disimpulkan bahwa aliran 12 liter/menit merupakan aliran yang paling optimum untuk percobaan ini. terdapat pada aliran 12 liter/menit. Data koefisien perpindahan panas untuk aliran 12 liter/menit ditunjukkan pada gambar grafik berikut.



Gambar 4.3 Grafik koefisien perpindahan panas (h) terhadap titik pengukuran dengan variasi daya pada debit aliran 12 liter/menit

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa koefisien perpindahan panas menurun dengan semakin tingginya posisi titik pengukuran. Grafik-grafik yang ditampilkan sebelumnya juga menampilkan temperatur nanofluida yang cenderung meningkat dengan semakin tingginya posisi titik pengukuran. Hal tersebut terjadi karena nanofluida mendapatkan pemanasan secara terus menerus pada saat melewati sub-buluh dari titik pengukuran terbawah. Kemampuan penyerapan panas nanofluida juga semakin berkurang seiring dengan pertambahan ketinggian titik pengukuran. Hal tersebut ditandai dengan selisih temperatur dinding dan temperatur nanofluida yang semakin besar seiring dengan semakin tingginya posisi titik pengukuran.

Penentuan jenis aliran konveksi dibutuhkan untuk menentukan persamaan korelasi yang tepat. Berdasarkan analisis bilangan Richardson (Gr/Re^2). Nilai Grashof dan Reynolds diperoleh dari persamaan 2 dan 3. Kedua persamaan dari bilangan tak berdimensi tersebut mengandung beberapa parameter termofisik nanofluida. Dalam penentuan jenis konveksi dan pembuatan korelasi, beberapa parameter termofisik nanofluida Al_2O_3 perlu diketahui nilainya. Berikut data dari beberapa parameter termofisik nanofluida air- Al_2O_3 yang ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perhitungan parameter termofisik nanofluida air- Al_2O_3 0,05%

Parameter termofisik	Persamaan	Hasil
Massa jenis	$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_b + \phi\rho_p$	1144 kg/m ³
Viskositas	$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi)\mu_b$	0,001117125 kg/ms
Konduktivitas panas	$k_{nf} = \frac{[k_p + 2k_b f - 2\phi(k_b - k_{inf})]}{k_b + 2k_b f + \phi(k_b - k_{inf})}$	1,149872989 W/mK
Panas spesifik	$C_{p,nf} = \phi C_{p,p} + (1 - \phi)C_{p,b}$	4011,55 J/kgK

Dengan mengetahui nilai dari beberapa parameter termofisik nanofluida air- Al_2O_3 , maka nilai Grashof dan Reynolds untuk setiap variasi percobaan dapat dikalkulasikan. Nilai Richardson yang dihasilkan untuk seluruh percobaan berada diatas 1. Hal tersebut menunjukkan jika aliran juga dipengaruhi oleh konveksi alami sehingga dapat dikatakan bahwa aliran fluida pada percobaan ini tergolong ke konveksi gabungan karena perpindahan panas terjadi akibat penggunaan pompa dan juga perbedaan kerapatan yang diakibatkan oleh gradien temperatur.

Berdasarkan penelitian disertasi yang dilakukan oleh Diah Hidayanti Sukarno yang berjudul Studi Konduktivitas Termal dan Perpindahan Panas Konveksi Fluida Nano ZrO_2 -Air, dihasilkan persamaan korelasi gabungan untuk air yang dinyatakan pada persamaan 10 [6].

$$Nu = 1,821 Gz^{0,557} Ri^{0,027}; 353,00 \leq Gz \leq 4154,51 \text{ dan } 1,87 \leq Ri \leq 158,30 \tag{10}$$

Penelitian tersebut menggunakan alat uji yang sama dengan alat uji pada penelitian ini dan korelasi yang dihasilkan berlaku dari aliran 5, 7, 9, 11, 13, 15 dan 17 liter/menit untuk variasi daya dari 100 W hingga 700 W. Dari persamaan korelasi berikut, didapatkan bahwa pangkat dari bilangan Graetz lebih tinggi dari pangkat bilangan Richardson. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengaruh konveksi paksa dalam aliran konveksi gabungan masih mendominasi.

Konsentrasi nanofluida yang digunakan pada penelitian ini sangat kecil sehingga dapat diasumsikan penggunaan fluida nano Al_2O_3 pada penelitian ini juga menghasilkan aliran konveksi gabungan yang didominasi oleh konveksi paksa. Oleh karena itu pembuatan korelasi perpindahan panas pada penelitian ini hanya berfokus pada konveksi paksa baik untuk fluida kerja air maupun fluida kerja air Al_2O_3

Berdasarkan grafik hubungan antara temperatur dengan posisi titik pengukuran yang telah dipaparkan sebelumnya, temperatur akan cenderung naik dengan semakin tingginya posisi titik pengukuran. Hal tersebut juga berlaku pada nilai koefisien perpindahan panas (h) yang juga cenderung turun dengan semakin tingginya posisi pengukuran. Oleh karena itu, bilangan Nusselt yang dihasilkan tidak konstan sehingga dapat disimpulkan bahwa aliran yang digunakan pada percobaan ini masih dalam keadaan berkembang. Sehingga persamaan korelasi yang sesuai adalah hubungan antara parameter Nusselt dengan Graetz seperti yang dituliskan pada persamaan 6.

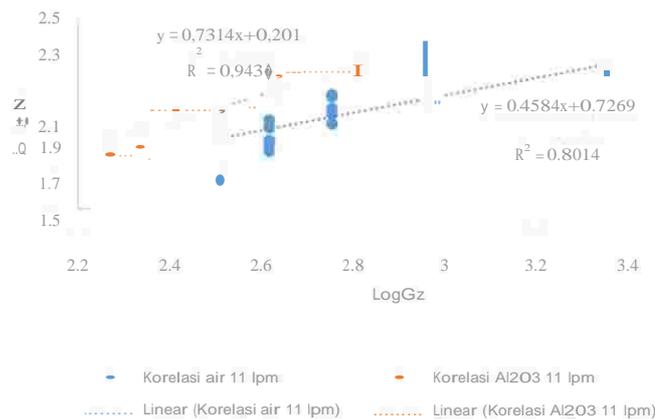
Adapun bentuk persamaan korelasi yang dihasilkan untuk aliran 6, 10, dan 12 liter/menit nanofluida air-Al₂O₃ adalah sebagai berikut.

$$Nu = 6,321 Gz^{0,446}; 159,012 \leq Gz \leq 556,542 \tag{11}$$

$$Nu = 0,864 Gz^{0,761}; 265,020 \leq Gz \leq 927,570 \tag{12}$$

$$Nu = 1,727 Gz^{0,707}; 318,024 \leq Gz \leq 1113,084 \tag{13}$$

Pembuatan persamaan korelasi untuk air sebagai pembanding menggunakan data air yang diperoleh dari percobaan yang dilakukan oleh Diah Hidayanti Sukarno dari disertasi yang berjudul Studi Konduktivitas Termal dan Perpindahan Panas Konveksi Fluida Nano ZrO₂-Air. Data air yang digunakan dalam percobaan tersebut menggunakan alat uji yang sama dan variasi daya yang sama namun dengan variasi debit aliran yang berbeda yaitu 7 liter/menit, 9 liter/menit, 11 liter/menit, 13 liter/menit, 15 liter/menit, dan 17 liter/menit. Korelasi yang dibuat hanya diambil dari salah satu variasi debit aliran yaitu 11 liter/menit. Pemilihan 11 liter/menit didasarkan karena percobaan nanofluida air-Al₂O₃ mengaplikasikan beberapa variasi aliran yaitu 10 liter/menit dan 12 liter/menit, sehingga korelasi 11 liter/menit untuk fluida air akan mudah dibandingkan dengan rata-rata korelasi dari 10 liter/menit dan 12 liter/menit nanofluida air-Al₂O₃. Berikut ditampilkan grafik korelasi air dan nanofluida air-Al₂O₃ pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik perbandingan persamaan korelasi antara air dan nanofluida air-Al₂O₃

Adapun bentuk persamaan korelasi untuk air dan nanofluida air-Al₂O₃ ditampilkan pada Persamaan 14 dan 15. Nu

$$= 4,412 Gz^{0,458}; 489,841 \leq Gz \leq 3428,886 \tag{14}$$

$$Nu = 1.276 Gz^{0,731}; 291,522 \leq Gz \leq 1020,327 \tag{15}$$

Grafik korelasi nanofluida air-Al₂O₃ terlihat lebih curam daripada grafik korelasi air. Hal tersebut dikarenakan nilai koefisien perpindahan panas (h) yang merupakan komponen bilangan Nusselt untuk nanofluida air-Al₂O₃ jauh lebih tinggi daripada air dan rentang log Gz untuk nanofluida air-Al₂O₃ lebih kecil dari air.

Contoh hasil perbandingan nilai koefisien perpindahan panas yang dihasilkan dari persamaan 14 dan 15 ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 4.4 Perbandingan nilai h dari korelasi air dan nanofluida air-Al₂O₃ debit aliran 11 liter/menit

Posisi "x" pengukuran (m)	Graetz $(Re Pr \frac{Dh}{x})$		Nusselt		h (W/m ² °C) $(\frac{Nu k}{Dh})$	
	air	air-Al ₂ O ₃	Air	air-Al ₂ O ₃	air	air-Al ₂ O ₃
0,2 m	857,221	510,164	97.528	122.017	2352,910	5047.583
0,25 m	454,740	270,614	88,150	103,758	2124,100	4287,086
0,35 m	489,841	291,522	75,460	81.033	1820,525	3352.166

Berdasarkan tabel tersebut, nanofluida air- Al_2O_3 memiliki kemampuan perpindahan panas yang lebih baik dari air. Hal tersebut ditunjukkan dengan perbedaan nilai koefisien perpindahan panas nanofluida air- Al_2O_3 yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nilai koefisien perpindahan panas untuk fluida air.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian ini, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan perhitungan bilangan Reynolds dan Grashof yang didapat, alat uji yang digunakan beserta dengan variasi aliran yang diaplikasikan sudah menghasilkan konveksi paksa.
2. Persamaan korelasi empiris yang didapat untuk nanofluida air- Al_2O_3 untuk debit aliran 6 liter/menit, 10 liter/menit, dan 12 liter/menit adalah sebagai berikut.

$$\text{Nu} = 6,321 \text{ Gz}^{0,446}; 159,012 \leq \text{Gz} \leq 556,542$$

$$\text{Nu} = 0,864 \text{ Gz}^{0,761}; 265,020 \leq \text{Gz} \leq 927,570$$

$$\text{Nu} = 1,727 \text{ Gz}^{0,707}; 318,024 \leq \text{Gz} \leq 1113,084$$

3. Koefisien perpindahan panas yang didapat dari percobaan akan naik seiring dengan kenaikan daya dan debit aliran, namun akan turun seiring dengan semakin tingginya posisi pengukuran. Pada percobaan ini, koefisien perpindahan panas maksimum yang dihasilkan untuk setiap input daya pemanas diperoleh pada saat menggunakan aliran dengan debit 12 liter/menit.
4. Perbandingan nilai koefisien perpindahan panas antara air dengan nanofluida air- Al_2O_3 cukup besar. Berdasarkan perhitungan nilai h yang didapat baik dari persamaan korelasi maupun data percobaan, rata-rata koefisien perpindahan panas (h) nanofluida air- Al_2O_3 lebih tinggi hampir 90% dari koefisien perpindahan panas untuk air dalam kondisi variasi percobaan yang sama.

Daftar Pustaka

- [1] O. S. Prajapati and A. Rajvanshi, "Effect of Al_2O_3 -Water Nanofluids in Convective Heat Transfer," *International Journal of Nanoscience*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2012.
- [2] L. Colla, L. Fedele, O. Manca, L. Marinelli and S. Nardini, "Experimental and Numerical Investigation on Forced Convection in Circular Tubes," in 4th Micro and Nano Flows Conference, London, 2014.
- [3] J. Buongiorno and L.-w. Hu, "Nanofluid Heat Transfer Enhancement for Nuclear Reactor Applications," in ASME 2009 2nd Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference, Shanghai, 2009.
- [4] A. Waluyo, N. P. Tandian and E. Umar, "Studi Perpindahan Panas Konveksi pada Susunan Silinder Vertikal dalam Reaktor Nuklir atau Penukar Panas Menggunakan Program CFD," in Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir PTNBR, Bandung, 2009.
- [5] M. Maktabifard and N. P. Tandian, "Theoretical Study of Forced Convective Heat Transfer in Hexagonal Configuration with 7Rod Bundles Using Zirconia-water Nanofluid," in Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV), Banjarmasin, 2015.
- [6] D. H. Sukarno, *Studi Konduktivitas Termal dan Perpindahan Panas Konveksi Fluida Nano ZrO_2 -Air*, Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2016.